

基于光纤自适应耦合和自调谐的光纤光栅传感系统设计

余 鸣¹, 傅志中²

(1. 芜湖职业技术学院 电气学院, 安徽 芜湖 241000)

(2. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对光纤光栅传感系统应用中面临的应变弱和可靠性不稳定等问题, 研究并设计了一种基于自适应耦合切换和自调谐光纤光栅传感系统; 主要从事首先, 基于光纤光栅的波长边化特点和多耦合特性设计了自适应耦合功能器件, 并依据波长交叉点特性建立了长—短周期切换算法, 然后考虑了波长对工作电压和耦合周期的影响特点, 设计了支持自调谐功能的光纤光栅传感器及其调谐算法, 最后给出了具有自适应多耦合切换和自调谐功能的光纤光栅传感系统; 主要从事实验表明, 在检测精度、抗干涉能力和应变能力等方面, 所提方案表现出了明显优势。

关键词: 光纤光栅传感器; 自适应; 多耦合; 自调谐

Fiber Bragg Grating Sensor System Based on Adaptive Fiber Coupling and Self-tuning

Yu Ming¹, Fu Zhizhong²

(1. Institute of Electrics, Wuhu Vocational Technical College, Wuhu 241000, China; 2. College of Photoelectric Information Engineering and Computer, Shanghai University of Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: there are some problems in the application of fiber grating sensor system, such as Strain weak and unstable for reliability So, we studied and designed the self-tuning adaptive switching and coupling Fiber Bragg grating (FBG) sensing systems. First, based on the characteristics of the fiber grating wavelength side of the coupling characteristics of the design and multi-function devices and adaptive coupling point based on characteristic wavelength cross-established long-short cycle switching algorithm, and then consider the impact of the characteristics of the wavelength of the operating voltage and the coupling cycle design FBG sensor and tuning algorithm supports self-tuning capabilities. Finally, the FBG sensing system coupled with an adaptive multi-switching and self-tuning capabilities. Experiments show that in terms of detection accuracy, anti-interference ability and adaptability, etc., the proposed scheme showed a clear advantage.

Keywords: fiber Bragg grating sensor; adaptive; multiple coupling; self-tuning

0 引言

光纤光栅利用其波长与外界测量参量之间的关系应用于测量应变、温度和压力等场合。随着光纤光栅传感器的制作工艺、封装流程、检测精度等技术的发展, 在工业、农业和医疗^[1]等领域得到广泛关注, 光纤光栅传感系统如图 1 所示, 在双激光器和复用等方面取得一系列成果^[2-3]。

文献 [4] 将反射式成像系统与可编程逻辑器件相结合研制了一种新型信号解调光纤光栅传感解调系统。文献 [5] 结合阵列波导光栅设计了一种能够快速将携带传感信息的反射波长实现数字化操作的光纤布拉格光栅传感网。文献 [6] 通过使用 CDMA 技术对光纤光栅反射信号进行分类设计了布拉格光纤光栅传感系统。文献 [7] 通过分析光纤光栅应变传感系

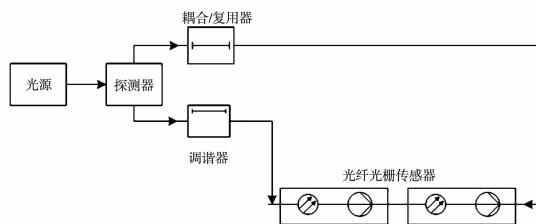


图 1 光纤光栅传感系统

统的空域与干扰噪声之间关系进一步简化解调系统的硬件结构和计算复杂度。

文献 [8] 设计了一种适用于光可调谐滤波器的传感解调系统的对微弱传感信号敏感的光电检测和处理电路及其检测方法。文献 [9] 从温度控制和驱动元件分离等角度出发研究了能够降低解调受热噪声干扰的分离方案。Guo-Ming Ma 等人基于光纤布拉格光栅传感技术设计了一种具有快速故障检测与定位和抗电磁干扰等能力的新型氢传感器。

在已有研究成果的基础上, 从耦合和调谐出发, 本文在光纤光栅传感系统研制方面主要做了如下工作: 1) 针对宽谱光源, 设计了补偿处理方法, 并基于长周期和短周期分类建立了自适应耦合器及其自调节切换算法; 2) 在耦合器的性能分析中发现传感系统工作电压有跳变现象, 于是设计了基于自适应

收稿日期: 2014-10-18; 修回日期: 2015-03-31。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41076061, 40876052, 60543002); 国家科技创新基金项目 (11C26213402042)。

作者简介: 余 鸣 (1957-), 男, 安徽桐城人, 副教授, 主要从事数字化测量技术、智能化测量技术方向的研究。

傅志中 (1956-), 男, 上海人, 教授, 主要从事计算机应用技方向的研究。

耦合的可调谐器件及其调谐算法; 3) 基于自适应耦合、补偿和自调谐功能, 研究并设计了高可靠性和检测精度的光纤光栅传感系统。

1 自适应耦合解调算法

光纤光栅主要是通过周期性的纤芯轴向折射光纤进行传感, 光栅波长会随着外界参量的变化而改变, 波长变化速率遵循公式 (1) 所示关系。

$$\begin{cases} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \varphi E + F\Delta t \\ E = [\epsilon, T, \dots]^T \\ F = [\epsilon_\lambda, T_\lambda, \dots]^T \end{cases} \quad (1)$$

其中: λ 为光栅波长, φ 为光栅抗外界干涉因子, 向量 E 为外界参量分类, 向量 F 为各类外界参量干涉变化因子。

如图 1 所示, 在光纤光栅传感系统中加入了耦合/复用器, 通过对宽谱光源进行耦合后使其波长满足公式 (1) 所示关系, 从而能够使用光纤光栅传感器进行检测, 其工作原理如图 2 所示。

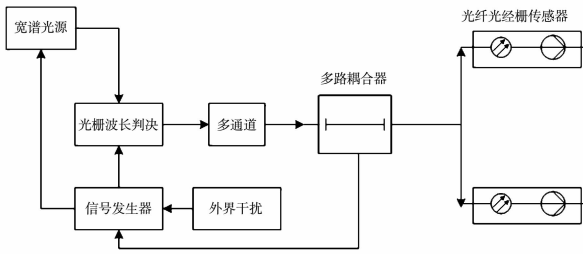


图 2 光纤光栅传感器耦合原理

其中, 光栅波长判决时在耦合之前结合外界干扰对宽谱光源进行补偿处理。

一般而言, 光纤光栅按周期可分为长和短周期光纤光栅, 如果模式耦合后光束传播方向相反则此时为短周期反射光纤光栅, 如果在基膜与包层膜之间为长周期的透射光纤, 根据周期值定义得到复合式光纤光栅折射关系, 如公式 (2) 所示。

$$\begin{cases} n_{(T_{th}, R_e)} = \max\{n_0 \sin(\alpha + k\pi), n_1 \sin(\beta + \gamma\pi)\} \\ T_{th} = \kappa |\sin(\alpha + k\pi) - \sin(\beta + \gamma\pi)| \\ R_e = \cos(2\lambda\kappa\pi) \end{cases} \quad (2)$$

其中: n_0 和 n_1 分别表示长周期和短周期光纤光栅权重, α 表示反射弧度, β 表示透射弧度, k 表示反方向耦合光束传播时反射概率, γ 表示膜间光栅透射概率, T_{th} 为光纤光栅周期值, 对光纤光栅进行分类, R_e 为复合光纤光栅折射率。以上参量满足如公式 (3) 所示函数关系。

$$G(\alpha, \beta, R_e) = \alpha G(n_0) + \beta G(n_1) + R_e \sum_{T=0}^{2T_{th}} \cos(\kappa T + \pi) \quad (3)$$

其中: $G(n_0)$ 表示长周期光纤光栅耦合度, $G(n_1)$ 表示短周期光纤光栅耦合度。基于多路复用光纤耦合器存在如公式 (4) 所示关系。

$$G(n_0) = \rho G(n_1) = \frac{1}{2} \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} G(n_0, n_1) \quad (4)$$

其中: ρ 表示光纤光栅折射与透射等效比例系数。

然后对光谱从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 进行积分操作:

$$H(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(\alpha, \beta, R_e) d\lambda =$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} G(R_e) \ln[\alpha\lambda + \cos(\beta\lambda + \pi)] d\lambda = (\alpha\lambda + \beta) \text{Incos}\left(\frac{3}{2}\pi\right) \int_{-\infty}^{+\infty} G(R_e) d\lambda \quad (5)$$

多路复用光纤耦合器电路如图 3 所示, 其中以一个运算放大器为核心, 其 1, 4, 7 和 8 号引脚连接光纤光栅反射膜, 通脱电阻电容结合电路进行耦合解调。该耦合器电路耦合能力可由公式 (1), (3) 和 (5) 计算得到其归一化强度, 如图 4 所示, 可见图 3 所设计的耦合电路具有规整的归一化强度, 适合于光纤光栅传感器结构。

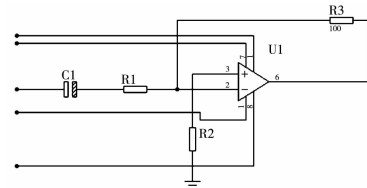


图 3 多路复用光纤耦合器电路

图 5 给出了采用图 3 所示耦合复用电路时长周期和短周期光纤光栅传感器的波长情况, 发现动态环境下长周期与短周期光纤光栅传感器解调时存在交替情况和交叉点, 因此可以考虑复合式基于阈值选择最佳解调方案, 具体流程描述如下:

- 1) 根据监测环境特点统计得到外界参量向量 E ;
- 2) 依据公式 (2) 给出复合式光纤光栅折射率定义;
- 3) 根据公式 (3) 所示函数关系经积分后得到复合耦合决策依据;

4) 根据前文所提出的复合耦合波长分析模型得到耦合切换周期阈值, 从而实现光纤光栅传感器的自耦合功能。

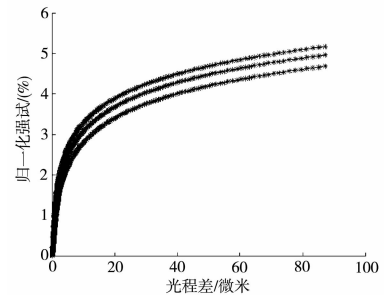


图 4 归一化强度分析

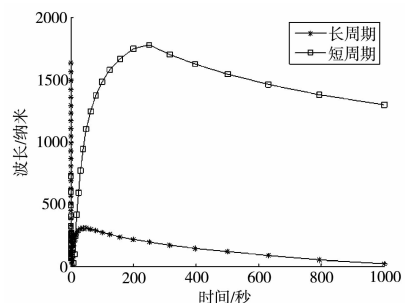


图 5 耦合下波长分析

2 可自调谐光纤光栅传感系统

定义图 3 所示光纤光栅传感系统中的耦合器输出端的 1 号和 8 号引脚的输出工作电压为 $V_{(1,8)}$, 可由公式 (6) 得到。

$$V_{(1,8)} = IZ = I(R + R_c(\alpha C + \frac{\beta}{\kappa}\lambda)) \quad (6)$$

其中： I 表示传感器工作电流， R 表示系统总电阻包括电源内阻、电路内阻、负载阻值等， C 表示电容容抗值。

使用公式(6)分析波长对工作电压的影响，需要满足两个前提条件。其一，总阻抗 $|Z|e^{j\theta}$ 的模具有公式(7)所示关系；其二， α 和 β 以及频率满足公式(8)所示关系。

$$|Z| = \sqrt{R_0^2 + R_1^2} = \sqrt{R_0^2 + \cos(\alpha + \beta^2)} \quad (7)$$

其中： R_0 是电源内阻为常数。

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(\frac{fRC}{Z}\right) \\ \beta = \arctan\left(\frac{\omega C}{R}Z\right) \\ \omega = 2\pi f \end{cases} \quad (8)$$

在满足公式(7)和(8)之后，根据外界参量和波长分析输出工作电压变化，结果如图6所示。发现，波长较小时电压值较大而且比较集中，但当波长小幅增大即迅速下降至0，之后出现2中趋势，一种平稳增大后保持稳定工作电压，另一种先增大后持续降低直至0。表明只采用图3所示的多路复用光纤耦合器电路时，光纤光栅传感系统工作电压不稳定，无法为传感系统提供可靠的工作环境，可以通过系统自调谐解决问题，基于图6结论设计的自调谐滤波器电路如图7所示，其中2个外接引脚即微控芯片的28号和31号引脚连接图3所示的耦合器的1号和8号引脚，实现自适应耦合和自调谐相结合的光栅光纤传感系统。

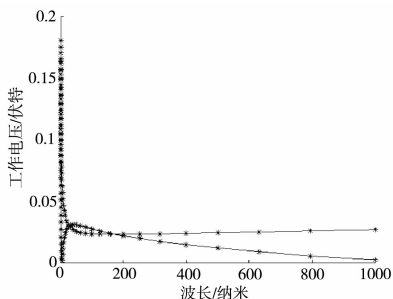


图6 耦合器输出工作电压

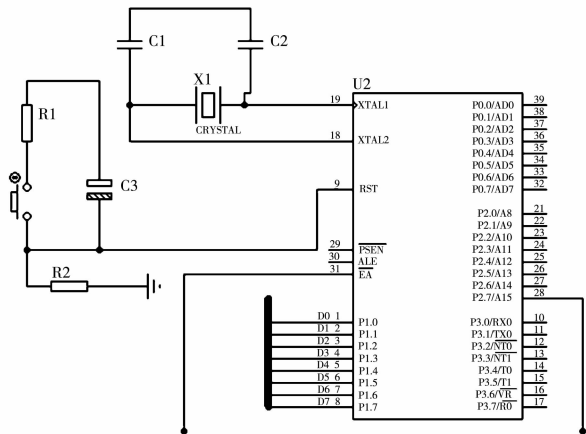


图7 自调谐电路

通过自适应耦合决策短周期或长周期设计光纤光栅传感器，连接自调谐电路后实现工作状态平滑和稳定控制，其效果如图8所示。发现，在990纳米值1010纳米之间输出工作电压发生

剧烈跳变，严重影响光纤光栅传感系统，单耦合无法解决，而加入可调谐后可将电压值恢复至正常状态，避免了跳变。

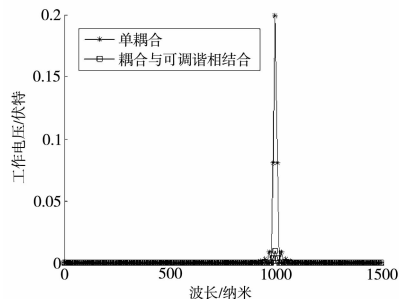


图8 耦合与调谐结合方案性能分析

3 实验验证

实验中，布设的光纤光栅传感系统中，分别使用了单耦合方案(C-FBGs)和自适应耦合与可自调谐方案(CT-FBGs)，进行了同参量同环境测量对比。

在三维正交方向上部署同类型光纤光栅传感器节点，固定在测量材质表面，测量材质放置于一个温度可调实验箱中，可以热循环或冷循环实现升温或降温测试。温度从0~100度变化，三维空间温度测量参考参量设置如表1所示。

表1 三维测量参量

	波长/纳米	折射弧度/度	透射表面弧度/度
X	1 534	7.45	145
Y	1 549	56	123
Z	1 548	31	89

实验中统计2组数据，第一组是改变温度测量波长值，第二组数据时分析波长变化给应变带来的影响。实验结果如图9所示。从图9中可以看出，所提方案中设计的耦合器具有自适应能力，可以再长周期和短周期期间根据实时情况自调节切换，所以光束波长受到的负面影响较小，而且可以保持较高的合理值如图9(a)所示。因为加入了自调谐电路和算法，所以所

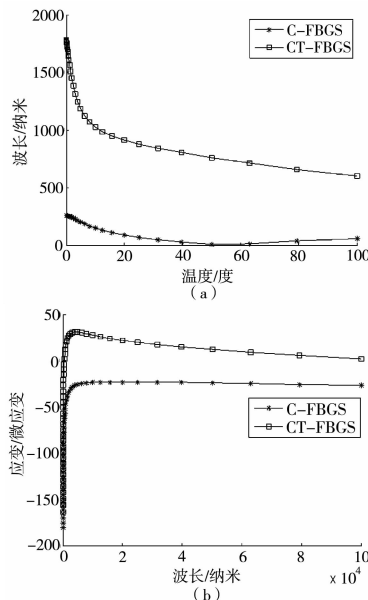


图9 监测与应变能力分析

提方案的传感系统的应变能力表现明显优于单耦合方案的传感系统。

4 结束语

光纤光栅传感系统经常用于对应变、温度和磁场等要求较高的测量应用中, 然而受到各类外界参量的干涉, 监测精度和系统稳定性面临挑战。基于该类问题, 本文从周期性的纤芯轴向折射和透射角度出发, 基于分类设计了自适应耦合器件及其切换机制, 接着基于复合耦合决策输出电压特性提出了自调谐光纤光栅器件及其调谐算法, 最后结合光纤复合耦合器和自调谐电路给出了一种新型的光纤光栅传感系统布设方案。实验从波长、温度和应变等方面进行测量, 结果证明了与单耦合方案的传感系统相比, 所提方案布设的传感系统具有高可靠性、稳定性和检测精度。

参考文献:

[1] Chryssis A N, Saini S S, Lee S M, et al. Detecting hybridization of DNA by highly sensitive evanescent field etched core fiber Bragg grating sensors [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11 (4): 864-872.

[2] 章鹏博, 胡辽林, 华灯鑫, 等. 光时域反射—光纤光栅传感系统中双激光器的驱动设计 [J]. 中国激光, 2012, 39 (4): 85-90.
 [3] 祁耀斌, 吴敢锋, 王汉熙. 光纤布拉格光栅传感复用模式发展方向 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2012, 43 (8): 3058-3072.
 [4] 陈志伟, 谭中伟, 闫俊芳, 等. 光纤光栅传感系统的信号解调 [J]. 光电技术应用, 2012, 27 (2): 47-52.
 [5] 王玉宝, 管 超. 面向光接入网的光纤光栅传感数据数字化系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2012 (9): 092202.
 [6] 黎 威, 文泓桥. 基于 CDMA 的布拉格光纤光栅传感系统的仿真分析 [J]. 光学与光电技术, 2013, 11 (3): 23-26.
 [7] 刘志强, 刘甲春, 李沼云. 光纤光栅频域反射应变传感系统性能分析 [J]. 光器件, 2013 (10): 19-21.
 [8] 王亚萍, 胡辽林, 张卫超, 等. 分布式光纤光栅传感系统中微弱信号检测研究 [J]. 西安理工大学学报, 2013, 29 (4): 428-433.
 [9] 余有龙, 谭 玲, 李 茜, 等. 压电陶瓷发热对光纤光栅传感信号干涉解调的影响 [J]. 光学学报, 2014, 34 (5): 0506005.
 [10] Ma G M, Li C R, Mu R D. Fiber bragg grating sensor for hydrogen detection in power transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21 (1): 380-385.

(上接第 1771 页)

5.2 仿真实验

基于磁粉离合器的气动负载虚拟加载系统从总体构架上实现了输出加载力矩与承载系统之间的解耦, 从而避免了“多余力矩”的产生, 其建模仿真重点是在力矩指令 $T=100 \sin (2\pi \cdot f)$ 输入下, 检验负载模拟器的动态性能。采用图 4 数学模型, 在 MATLAB 环境下, 利用 Simulink 工具进行仿真, 分别取 $f=7 \text{ Hz}$ 与 20 Hz , 得到负载模拟器的输出力矩跟踪曲线如图 5~6 所示, 其中实线为输入力矩曲线, 虚线为输出力矩曲线。

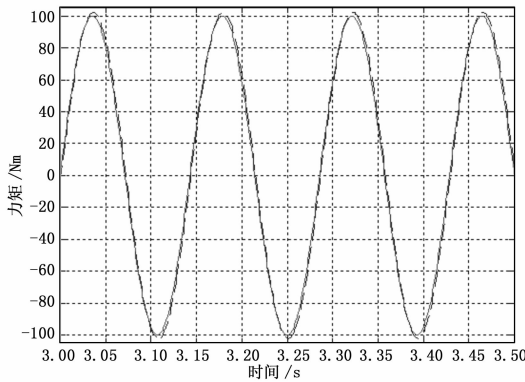


图 5 $T=100 \sin (2\pi \times 7)$ 输入下的系统输出

从图 5~6 中可以看出, 在 7 Hz 指令信号作用下, 负载力矩模拟器的幅度误差为 2.2%, 相位滞后为 -2.6° ; 在 20 Hz 指令信号作用下, 负载力矩模拟器的幅度误差为 8.9%, 相位滞后为 -7.6° 。

6 总结

基于磁粉离合器的气动负载虚拟加载系统以磁粉为工作介质, 以激磁电流为控制手段, 达到控制制动转矩或传递转矩的目的。利用外转子轴上连接的伺服电机的转向和转速, 来调节

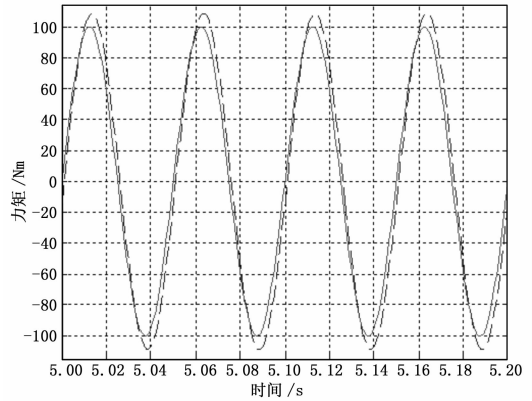


图 6 $T=100 \sin (2\pi \times 20)$ 输入下的系统输出

磁粉离合器产生力矩的方向, 配合电流调节力矩的大小, 使得负载模拟器的输出力矩跟随力矩指令的变化, 不影响负载模拟器电流的大小, 也不影响加载力矩的产生和调节, 从而避免了“多余力矩”的产生。从仿真结果中可以看出, 负载模拟器在不产生“多余力矩”的同时, 具有较好的动态特性指标。

参考文献:

[1] 张小磊, 宗光华, 牛国臣. 大扭矩电动负载模拟器的设计与研究 [J]. 电气与自动化, 2014, 43 (3): 175-178, 185.
 [2] 王跃轩, 陈俊杰, 黄玉平, 等. 新型舵机负载模拟系统电动加载技术研究 [J]. 航天控制, 2014, 32 (2): 79-86.
 [3] 范文澜, 李宏图, 李 想, 等. 电动操纵负荷系统在飞行模拟器中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25 (S): 401-407.
 [4] 郭 行, 陈 康, 孙 力, 等. 一种引入位置比例控制提高电动负载模拟器性能的控制系统设计方法 [J]. 西北工业大学学报, 2014, 32 (2): 235-239.
 [5] 魏 琼, 吴 帅, 焦宗夏, 等. 气动负载模拟器的多余力矩分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40 (9): 1213-1218.